

林木抚育对森林碳汇能力的影响及量化分析

王 欢

通辽市森林公园管护中心（通辽市国有科尔沁林场） 内蒙古 通辽 028000

摘 要：本文聚焦林木抚育对森林碳汇能力的影响及量化分析。阐述森林碳汇与林木抚育核心概念，剖析其理论基础。从植被、土壤、枯落物碳库三方面探讨影响机制，构建“储量-速率-稳定性”量化指标体系，优化量化方法并分析适配性。结合实践案例，阐述林业碳汇政策体系与落地路径、生态经济价值转化。研究表明科学抚育可提升森林碳汇能力，为制定抚育策略、推动林业可持续发展提供理论与实证依据。

关键词：森林碳汇；林木抚育；碳储量；生长模型；生态效益

引言：在全球气候变暖背景下，森林碳汇作为减缓气候变化的重要手段备受关注。林木抚育作为森林经营的关键措施，对森林碳汇能力有着显著影响。科学合理的抚育能优化林分结构，提升森林生态系统碳汇功能；反之，不当抚育可能导致碳库流失。然而，当前对林木抚育与森林碳汇关系的认识尚不完善，量化研究有待深入。本文旨在系统分析林木抚育对森林碳汇能力的影响机制，构建量化指标与方法体系，并结合实践案例提出政策建议，以促进森林碳汇事业发展。

1 林木抚育与森林碳汇的理论基础

1.1 核心概念界定

森林碳汇指森林生态系统通过光合作用吸收大气中CO₂，并以生物量、土壤有机质等形式固定储存的过程与能力，其核心评价指标为碳储量与固碳速率。林木抚育是依据林分生长规律与经营目标，采取间伐、修枝、抚育采伐等人为干预措施，调控林分密度、树种组成及生长环境的森林经营活动，按强度可分为轻度（采伐量 ≤ 15%）、中度（15%-30%）与重度（> 30%）三类。二者关联核心在于抚育通过改变林分微环境（光照、温度、养分），影响林木光合效率与碳分配策略，进而调控生态系统碳汇功能。需明确的是，林木抚育的碳汇效应具有双向性，科学抚育促进碳积累，过度抚育则可能导致碳库流失，因此需基于林分类型制定差异化方案。

1.2 森林碳汇形成与分配理论

森林碳汇形成以光合作用为核心，林木通过叶片吸收CO₂，将其转化为有机碳并分配至根、茎、叶等器官，形成植被碳库；枯枝落叶与根系凋落物进入土壤，经微生物分解转化为土壤有机碳，构建土壤碳库；未完全分解的枯落物构成枯落物碳库，三者共同组成森林生态系统碳库。碳分配遵循“最优生长策略”，当林分密度过高时，林木为争夺光照养分，碳更多分配至树干高生

长，根系与叶片碳分配减少；科学抚育后，林分竞争缓解，碳分配向树干、根系倾斜，提升碳储存稳定性。相关理论表明，成熟林碳汇速率趋于稳定，中幼林经抚育后碳汇潜力可提升30%-50%，这为抚育增汇提供了理论依据^[1]。

1.3 林木抚育的生态效应理论

林木抚育的生态效应围绕“资源优化配置”展开，核心理论包括密度效应理论与生态位理论。密度效应理论指出，林分存在最适密度阈值，超过阈值后种内竞争加剧，光合产物消耗增加，碳积累效率下降，抚育通过调整密度使林分处于最优生长状态，如杉木人工林最适密度为1800-2200株/hm²，此密度下固碳速率最高。生态位理论强调，抚育通过移除劣势树种与病弱木，为优势树种创造更优生态位，提升群落光合总量；同时改善林分通风透光条件，调节微气候，促进林下植被生长，增加碳汇层位。此外，抚育减少林分枯损率，降低病虫害发生风险，增强生态系统稳定性，为长期碳汇提供保障。

2 林木抚育对森林碳汇能力的影响机制

2.1 对植被碳库的影响机制

植被碳库是森林碳汇的核心载体，占生态系统碳库的40%-60%，林木抚育主要通过调控林分结构影响其碳积累。间伐措施移除过密木与劣质木，降低林分密度，使优势木获得充足光照与养分，光合速率提升15%-25%，胸径生长量增加20%-30%，如东北红松林经中度间伐后，优势木年胸径生长量从0.8cm增至1.2cm。修枝措施去除下部冗余枝条，减少非生产性碳消耗，使碳更多分配至树干，树干碳占比从65%提升至72%。抚育还能促进林下植被生长，阔叶混交林经抚育后，林下灌木与草本生物量增加40%，补充植被碳库。但重度抚育会导致即时碳流失，需控制采伐量，研究表明中度抚育是植被碳库短期损失与长期增益的平衡点。

2.2 对土壤碳库的影响机制

土壤碳库是森林生态系统最大碳库,占比达50%-70%,林木抚育对其影响具有复杂性与长期性。短期来看,抚育采伐产生的枯落物归还土壤,增加有机碳输入,同时间伐改善土壤通气性,促进微生物活动,加速有机质分解,可能导致土壤碳短暂流失。长期而言,科学抚育提升林木生产力,根系生物量增加30%以上,根系分泌物与凋落物持续补充土壤碳源;林下植被生长旺盛,枯落物产量提升,形成稳定碳输入。不同抚育强度影响差异显著,轻度抚育使土壤碳储量增加5%-8%,重度抚育则导致土壤碳储量下降10%以上。此外,抚育后林分微气候改善,土壤湿度保持稳定,减少碳矿化损失,维持土壤碳库稳定。

2.3 对枯落物碳库的影响机制

枯落物碳库是连接植被与土壤碳库的关键环节,林木抚育通过改变枯落物产量与分解速率影响其碳储量。抚育初期,采伐产生的枝条、落叶使枯落物输入量短期内激增,如杉木林中度抚育后1年内,枯落物碳储量从 $12\text{t}/\text{hm}^2$ 增至 $20\text{t}/\text{hm}^2$ 。抚育后期,林分生产力提升,优势木落叶量增加,同时林下植被枯落物补充,使枯落物持续稳定输入。分解方面,抚育改善林分通风透光条件,土壤温度提升 $1\text{--}2^\circ\text{C}$,微生物活性增强,枯落物分解速率提升15%-20%,加速碳向土壤碳库转移。研究显示,抚育后枯落物碳库周转周期从3年缩短至2.2年,虽短期碳储量波动,但促进了碳库循环,增强生态系统碳汇活力^[2]。

2.4 综合影响机制与关键调控因子

林木抚育对森林碳汇的综合影响是三大碳库协同作用的结果,形成“抚育干预-结构优化-碳汇提升”的链式机制:抚育通过密度调控优化林分结构,提升植被碳库积累效率;植被生产力提升带动枯落物输入增加,加速碳库周转;长期来看植被与枯落物碳输入支撑土壤碳库稳定,最终实现生态系统碳汇提升。关键调控因子包括抚育强度、抚育周期与林分类型。抚育强度以中度最优,可使整体碳汇能力提升20%-30%;抚育周期需匹配林分生长阶段,中幼林以5-8年为宜,近熟林可延长至10-12年;针叶林更需通过抚育改善光照条件,阔叶林间伐强度应低于针叶林,避免群落结构破坏。

3 林木抚育下森林碳汇能力的量化指标与方法体系

3.1 量化指标体系构建

基于“储量-速率-稳定性”这一科学且全面的三维框架,精心构建林木抚育下森林碳汇量化指标体系。核心指标中,碳储量涵盖植被、土壤、枯落物碳储量以及总碳储量,它是反映森林碳汇规模的关键指标,单位设

定为 t/hm^2 ,能直观呈现森林中碳的积累总量。固碳速率以年净固碳量为代表,单位是 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,这一指标可清晰体现森林碳汇的增长潜力,让我们了解森林每年新增固碳的能力。碳汇稳定性则通过碳库周转周期、抗干扰能力来评估,它关乎森林碳汇的长期效果。辅助指标方面,林分结构指标包含密度、胸径、郁闭度等,环境指标有土壤肥力、微气候参数等,这些指标有助于深入解释碳汇变化的内在机制。为确保量化结果科学合理,通过层次分析法确定指标权重,总碳储量与年净固碳量权重分别设定为35%与30%,既聚焦核心目标,又兼顾碳汇的可持续性。

3.2 碳汇量化方法优化与适配

结合林木抚育的独特特点,对现有碳汇量化方法进行优化并明确其适配场景。生物量清查法通过实测林木胸径、树高等参数,结合异速生长方程来计算植被碳储量。优化后引入抚育系数修正模型,极大提升了抚育林分的计算精度,将误差严格控制在5%以内,为准确评估抚育林分的碳汇能力提供了有力支持。涡度相关法能够实现生态系统尺度碳通量的实时监测,适用于长期定位观测。优化其数据滤波算法后,可有效排除因抚育干扰产生的异常数据,确保监测数据的准确性和可靠性。遥感反演法通过卫星影像提取林分参数,结合碳汇模型估算区域尺度碳汇,适合大面积抚育成效评估。引入哨兵-2号卫星高分辨率数据后,空间分辨率提升至 10m ,能够满足小班尺度的量化需求^[3]。不同方法可组合使用,实现“点-面”结合的精准量化,全面反映森林碳汇情况。

3.3 不同林分类型的方法适配性分析

由于林分类型存在差异,其碳汇特征也各不相同,因此需要针对性地选择量化方法。人工针叶林(如落叶松、杉木)结构相对均一,生物量清查法的适配性最优。采用基于胸径的异速生长方程即可满足精度要求,以东北落叶松人工林为例,应用该方法进行碳储量计算,误差仅3.2%,能较为准确地反映其碳汇情况。天然阔叶林树种复杂,林分结构异质性高,单一方法难以满足精度需求,需结合生物量清查与遥感反演法。通过样地实测数据对遥感模型进行校准,可提升量化精度。例如,亚热带天然常绿阔叶林采用该组合方法后,误差从12%大幅降至6.5%。混交林兼具人工针叶林和天然阔叶林的特点,推荐采用“生物量清查+涡度相关”组合法,既能精准计算样地碳储量,又能监测生态系统碳通量,从而全面评估抚育效果。

3.4 量化误差控制与精度验证

量化误差主要源于数据采集、模型选择与参数设

定,需多维度控制。数据采集阶段,样地设置采用系统抽样法,确保代表性,乔木样地面积不小于 0.04hm^2 ,土壤样品按0-20cm、20-40cm分层采集。模型选择需匹配林分特征,避免通用模型滥用,如针对抚育后幼林,采用包含林分密度参数的专用生长模型。参数设定通过实地校准实现,异速生长方程参数需基于本地林分实测数据修正。精度验证采用交叉验证法,将样地数据分为建模组与验证组,验证组计算值与实测值的决定系数 R^2 需 ≥ 0.85 。以云南松人工林为例,经误差控制后,碳储量量化精度从82%提升至94%,满足碳汇核算要求。

4 林木抚育碳汇的实践应用与政策保障

4.1 林业碳汇政策体系与落地路径

我国已构建“国家引导+地方落实”的林木抚育碳汇政策框架,国家层面通过《林业碳汇项目审定与核证指南》明确抚育碳汇的计入标准,将轻度抚育($<20\%$)产生的碳汇量纳入CCER交易范畴。地方层面,浙江、福建等林业大省出台补贴政策,对实施科学抚育的经营主体给予 $300\text{--}500\text{元}/\text{hm}^2$ 的资金支持。落地路径需遵循“项目备案-碳汇计量-核证交易”流程,企业可通过林业碳汇平台提交抚育方案,经第三方核证后生成碳汇资产,目前抚育碳汇交易价格稳定在 $60\text{--}80\text{元}/\text{吨CO}_2$,为林农提供额外收益^[4]。

4.2 典型区域抚育碳汇实践案例

福建省三明市作为林业改革示范区,开展针阔混交林抚育碳汇试点,采用 17% 轻度间伐强度,结合无人机监测与生物量法核算,3年累计产生碳汇量 12.5万吨 ,通过CCER交易实现收益 925万元 。该案例创新“抚育+碳汇+合作社”模式,由林业合作社组织实施抚育,企业购买碳汇指标,林农按持股比例分红。内蒙古大兴安岭林区针对落叶松林,采用修枝结合轻度间伐的抚育方式,5年使单位面积碳汇量提升 8.3% ,验证了北方针叶林抚育碳

汇的潜力,为寒温带林区提供参考。

4.3 抚育碳汇的生态经济价值转化

林木抚育碳汇实现了生态价值与经济价值的双赢,生态层面,科学抚育使林分抗逆性提升,三明试点林分病虫害发生率下降 40% ,固土保水能力增强。经济层面,碳汇收益可反哺抚育投入,弥补传统林业经营收益低的问题,大兴安岭案例中碳汇收益占林农总收入的 15% 。价值转化需强化“政企民”协同,企业发挥资金与技术优势,政府搭建交易平台,林农参与抚育实施,同时探索“碳汇+生态旅游”融合模式,提升林业综合效益,推动生态优势转化为经济优势。

结束语

林木抚育对森林碳汇能力的影响是多方面且复杂的,通过合理调控抚育强度、周期等关键因子,可有效提升森林碳汇规模、速率与稳定性。量化指标与方法体系的构建,为精准评估抚育成效提供了科学手段。实践应用表明,林木抚育碳汇在生态保护与经济发展中具有巨大潜力,通过完善政策体系、创新模式,可推动生态价值向经济价值转化。未来需进一步加强研究,优化抚育策略,以充分发挥森林碳汇在应对气候变化中的重要作用。

参考文献

- [1]向柳.森林经营管理中提高森林碳汇能力的措施[J].现代农业科技,2021(20):125-126.
- [2]吴秀梅.森林抚育对森林生态系统的影响分析[J].农村科学实验,2021(23):19-20.
- [3]刘翊.探究森林抚育技术要点对森林生态系统的影响[J].河北农机,2022(16):91-93.
- [4]王杰.杨中宁.抚育间伐对林木生长及生态环境的影响[J].南方农业,2022,16(10):60-62.